

TUNNELDRIVNING I HETEROGENA FÖRHÅLLANDEN

Tunnelling in heterogeneous ground conditions

Diego Lope Álvarez, Itasca Consultants AB

Jonny Sjöberg, Itasca Consultants AB

Rebecca Bertilsson, Statens Geotekniska Institut

Magnus Eriksson, Trafikverket (tidigare Statens Geotekniska Institut)

Diego Mas Ivars, Svenska Kärnbränslehantering AB (tidigare Itasca Consultants AB)

SAMMANFATTNING

Tunneldrivning i stadsmiljö är en utmaning p.g.a. begränsat med plats och begränsade möjligheter att välja sträckning. En svårighet som kan uppkomma är att tunnlar kan behöva drivas med tunnelfront i både jord och berg. I detta forskningsprojekt har tunneldrivning i heterogena förhållanden studerats, där syftet var att öka kunskapen och förståelsen om brott- och deformationsmekanismer vid dessa förhållanden. En principstudie av olika scenarion genomfördes, följt av en praktikfallstudie baserad på passagen av Maria Magdalena kyrka för projekt Citybanan i Stockholm. Passagen av Maria Magdalena kyrka kännetecknades av att en sträcka om ca. 30 m som saknade bergtäckning. Slutsatserna från principstudien var att jordens stratigrafi och jordlagrets egenskaper är de faktorer som i högst grad styr hur stora deformationer som uppkommer vid markytan. I praktikfallsstudien kunde en god korrelation med uppmätta deformationer erhållas, men deformationerna på markytan var mycket känsliga för materialparametrarna i jordlagret.

SUMMARY

Tunnelling in urban areas is a challenging because of limited space and limitations in choice of path. A difficulty that may arise is that the tunnel has to be excavated through mixed-face conditions with both soil and rock. In this research project, tunnelling in heterogeneous ground conditions was studied, with the purpose to increase the knowledge and understanding about failure- and deformation mechanisms under these conditions. A generic study of different scenarios of mixed-face conditions was performed, followed by a case study based on the tunnelling under Maria Magdalena church for the City Link in Stockholm. The passage under the church was technically difficult due to mixed-face conditions for a distance of about 30 meters. The results from the generic study showed that the geometry of the soil layer and its properties were the most influencing factors for the ground surface settlements. In the case study, a good match between the numerical model results and measured settlements was achieved, but the surface settlements proved to be very sensitive to variations in soil strength parameters.

1 INLEDNING

Tunneldrivning är ett område som är förknippat med många tekniska utmaningar. Metoder att hantera olika frågeställningar utvecklas kontinuerligt för att effektivisera byggandet eller minska miljö- och omgivningspåverkan. Svårigheterna att i förväg välja rätt teknik, bedöma omgivningspåverkan och på ett relevant sätt beskriva konsekvenser samt uppskatta kostnader är på olika sätt beroende av att kunna bedöma och beräkna hur en konstruktion kommer att bete sig. Ofta behöver detta utföras med relativt stora osäkerheter i exempelvis geometri och materialegenskaper.

Föreliggande arbete behandlar området tunneldrivning i heterogena förhållanden och avser när tunnlar utförs huvudsakligen i berg men med inslag av betydligt lösare material, exempelvis en jordfylld svacka eller en förkastningszon. Frågeställningen är hur man kan prognostisera deformationsbeteendet vid markytan när tunneltvårsnittet har starkt heterogena egenskaper.

Några fall av tunneldrivning genom en blandning av jord och berg har genomförts i Sverige, även om det normalt är något man försöker undvika genom att ändra djupläget på tunneln eller ändra sträckningen så att en tunnel helt i berg erhålls. Det finns exempelvis sträckor på Citybanan och Norra Länken i Stockholm som har gått genom partier med jord i tunneltaket. Ofta passeras också svaghetszoner i berget, ofta med en benämning typ "yxhugg", där berget i svaghetszonen med tiden omvandlats och vittrat och erhållit jordliknande egenskaper.

Byggnadstekniskt går det som regel att utföra tunnlar med tvärsnitt både i jord och berg. Tekniker som involverar för-förstärkning, injektering eller frysning, kan temporärt förstärka tunneln under drivningen och möjliggöra att en bärande förstärkning kan installeras. I stadsmiljö med ovanliggande byggnader kan oönskade sättningar eller hävningar uppkomma under drivningen. För att kunna välja rätt teknik och förutsäga vilken omgivningspåverkan (deformation) tunneldrivningen kan orsaka behövs en grundläggande förståelse för vilka egenskaper som har stor påverkan samt hur deformationsbeteendet kan prognostiseras vid tunneldrivning genom heterogena förhållanden.

Studien har utförts i tre olika delar: (a) litteraturstudie inriktad mot internationell erfarenhet av tunneldrivning i heterogena förhållanden; (b) teoretisk principstudie baserad på 2D numerisk modellanalys; och (c) tillämpad praktikfallstudie av Citybanans passage under Maria Magdalena kyrka. I denna artikel redovisas utvalda resultat från principstudien och praktikfallstudien.

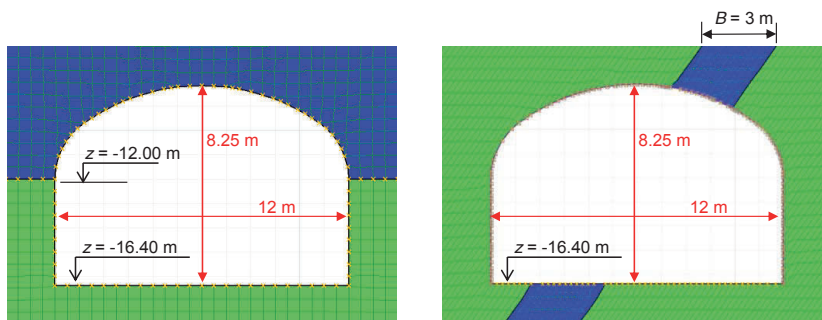
2 PRINCIPSTUDIE

2.1 Angreppssätt och beräkningsmodell

För att kvantifiera olika faktors relativa betydelse för tunnelstabilitet och deformationer runt tunneln och på markytan har flera känslighetsanalyser genomförts. Detta ger också värdefull information om betydelsen av precision i valda berg- och jordegenskaper, samt jordens stratigrafi vilket i sin tur ger insikt i vilka förundersökningar och/eller uttagssekvenser som krävs.

Modellberäkningar har utförts med det tvådimensionella finita-differensprogrammet *FLAC* (Itasca, 2011). Endast kontinuum-förhållanden har simulerats, d.v.s. inga diskontinuiteter i bergmassan eller jordlagret, med undantag för gränssnittet mellan berg och jord, där glidning och separation har tillåtits. Modellstorleken har valts för att minimera randeffekten, och tre olika typgeometrier har analyserats. I Figur 1 redovisas inzoomade typgeometrier A och C. Typgeometri A visar en bergmassa överlagrad av ett jämntjockt jordtäckje om 12 meter. Typgeometri A och B är lika, men i B har placering av jordlagret relativt tunneln varierats, och gränsen mellan jord och berg hamnar mitt i anfanget. I typgeometri C har ett 45° lutande jordlager analyserats, där tjockleken (B) har varierats.

Bergmassan antas ha god kvalitet och hämtades från projekteringsunderlaget för Citybanan i Stockholm, och typiska materialegenskaper för friktionsjord och lera har använts. Bergmassa och jordlager simulerades i beräkningsmodellen som idealplastiska Mohr-Coulomb material, och deras egenskaper redovisas i Tabell 1 (Eriksson m.fl., 2016). Värden på de initiala bergspänningarna i bergmassan har hämtats från Perman och Sjöberg (2007), från data gällande Normmalm. Initialspänningarna i jordlagret motsvarar en gravitativ vertikalspänning samt en isotrop horisontalspänning, där vilojordtryckscoefficienten (K_0) motsvarar 0.5 för lera och 0.4 för friktionsjord.



Figur 1 Beräkningsmodell geometri för typgeometri A och C, där jordlager visas i blått och berg i grönt.

Numerical model geometry for geometry type A and C, where the soil layer is depicted in blue and the rock mass in green.

Tabell 1 Materialegenskaper för numeriska analyser.

Material properties used in the numerical analyses.

Material	E [MPa]	ρ [kg/m ³]	c [kPa]	ϕ [°]	σ_t [MPa]	ν [-]	ψ [°]
Berg	39 000	2650	2700	58	0.5	0.25	7
Lera	1.5+0.18z	1600	10+1.2z	0	0	0.49	0
Friktionsjord	100	2200	1	40	0	0.35	10

E = elasticitetsmodul, ρ = densitet, c = kohesion, ϕ = friktionsvinkel, σ_t = draghållfasthet, ν = tvärkontraktionstal, ψ = dilatationsvinkel, z = djup under markytan [m].

I alla beräkningsfall analyserades dels ett fall utan någon grundvattenyta (dränerade förhållanden) och dels ett fall med en statisk vattennivå på 2 m djup under markytan (odränerade förhållanden). Tunneln har förstärkts för att uttag skall kunna ske utan tunnelkollaps, p.g.a. stora deformationer som uppkommer i jordlagret. Förstärkning i form av en sprutbetong-liner med varierande tjocklek, från sula till sula, har antagits. Sprutbetongens egenskaper finns beskrivna i Eriksson m.fl. (2016). Totalt 30 beräkningsfall med olika jordmaterial, djuplägen, grundvattenytor, uttagssekvenser, bergspänningar och förstärkning har genomförts. De utvalda beräkningsfall som redovisas i denna artikel visas i Tabell 2.

Tabell 2 Utvalda beräkningsfall för resultatredovisning.

Selected analyzed cases.

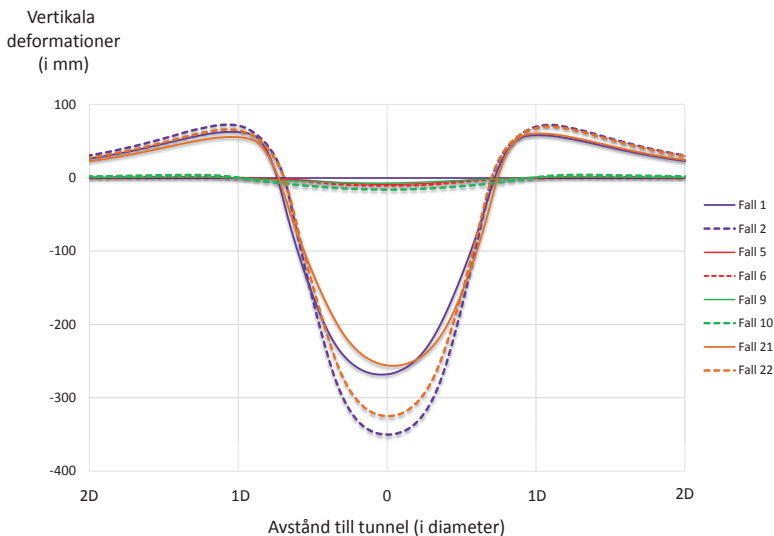
Fall	Jordtyp	Geo-metri	Jordlager tjocklek, B [m]	Grundvatten-yta	Tjocklek sprutbetong [mm]	Riktning största huvudspänning bergmassa (i förhållande till tunnelns längdaxel)
1, 2	Lera	A	-	Låg, Hög	400	Vinkelrätt
5, 6	Friktionsjord	A	-	Låg, Hög	100	Vinkelrätt
9, 10	Lera	B	-	Låg, Hög	150	Vinkelrätt
21, 22	Lera	A	-	Låg, Hög	400	Parallellt
51, 52	Lera	C	1	Låg, Hög	100	Vinkelrätt
53, 57	Lera	C	3, 2	Låg	100	Vinkelrätt
55, 56	Lera	C	5	Låg, Hög	100	Vinkelrätt

2.2 Resultat

Materialegenskaperna för jordmaterialet har mycket stor inverkan på tunnelns stabilitet samt uppkomna deformationer runt tunneln och på markytan. Beräknade vertikala deformationer på markytan för lera och friktionsjord visas i Figur 2. Skillnaden på maximala sättningar är ca. 30 ggr större för Fall 1 & 2 (lera) jämfört med Fall 5 & 6 (friktionsjord). Tunnelns placering i djupled, relativt gränsen mellan jord och berg, har också stor betydelse för resultaten oberoende vilka jordmaterial som simulerats, jämför t.ex. Fall 1 & 2 med Fall 9 & 10 (lera) i Figur 2. En ändring av orienteringen/riktningen på horisontalspänningarna i bergmassan ger i sin tur endast små skillnader i sättning och deformation runt tunneln, jämför Fall 1 & 2 med Fall 21 & 22 i Figur 2.

För fallet med ett lerlager som tvärrar tunneln (geometrifall C) visade beräkningarna att jordlagrets tjocklek har en stor påverkan på uppkomna deformationer på markytan, se Figur 3. En tunn zon med jord leder till hävning på markytan men endast mindre deformationer i anfanget av tunneln. För en tjock zon sker sättning på markytan och mindre omfattning dragbrott i bergmassan runt tunneln. När jordlagret är tunt så beter det sig närmast som en diskontinuitet (skjuvyta) men med ökande mäktighet deformeras jordlagret mer och sättning i jordlagret kan observeras.

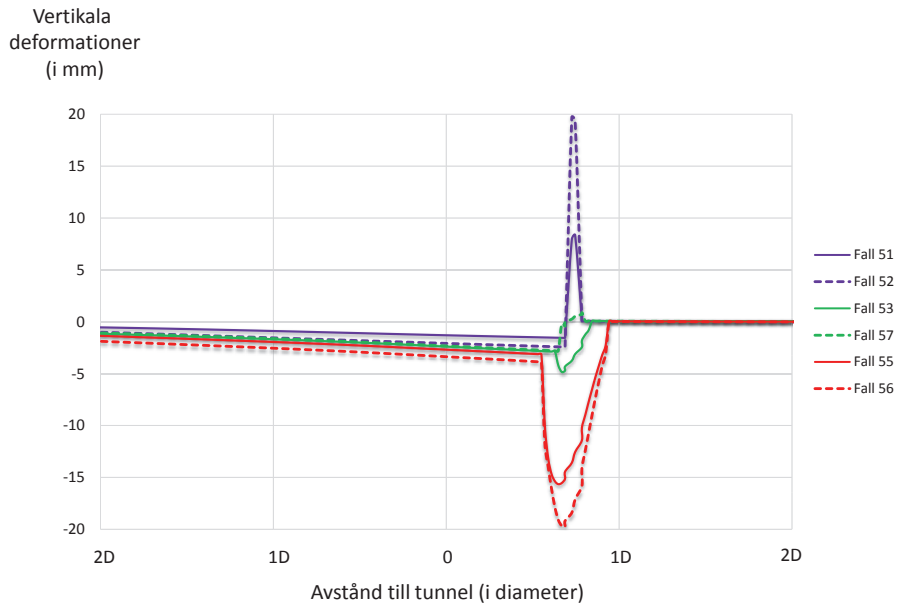
Grundvattenytans läge har liten påverkan på resultaten då jordlagret utgörs av friktionsjord, men för lerjord är påverkan måttlig till stor, jämför Fall 1 & 5 med Fall 2 & 6 i Figur 2. Detta beror främst på att friktionsjord har lägre hållfasthet och därför inte påverkas lika starkt av reducerade effektivspänningar.



Figur 2

Beräknade deformationer på markytan för typegeometri A och B.

Calculated deformation at the ground surface for geometry types A & B.



Figur 3 Beräknade deformationer på markytan för typgeometri C.
Calculated deformation at the ground surface for geometry type C.

3 PRAKTIKFALLSTUDIE

3.1 Inledning

Ett praktikfall har analyserats i syfte att jämföra beräkningsresultat mot verkliga observationer, samt även i möjligaste mån bekräfta slutsatserna från principstudien. Det utvalda praktikfallet är hämtat från passagen under Maria Magdalena kyrka i etapp Södermalmstunneln för projekt Citybanan. Passagen av Maria Magdalena kyrka kännetecknades av att en sträcka om ca 30 m saknar bergtäckning (se Figur 4, till höger), och där tunneln fick utföras som en injekterad jordtunnel. Under tunneldrivning inträffade ett skorstenras (typisk brottmekanism i friktionsjord) och ett sjunkhål om ca. 2 x 2 meter area och 1.5 meters djup uppmärksammades på markytan.

Praktikfallet har analyserats i en tredimensionell beräkningsmodell med finita differensprogrammet *FLAC3D* (Itasca, 2012). Såväl uttagssekvenserna som jordens stratigrafi (varierande topografi och jordlagertjocklek i området) medförde att en tredimensionell modell krävdes. Beräkningsmodellen har därefter kalibrerats mot uppmätta deformationer.



Figur 4 Översiktskarta över Citybanans sträckning i Stockholm till vänster, och inzoomad karta över Södermalm till höger, där området av intresse är markerat i gult.

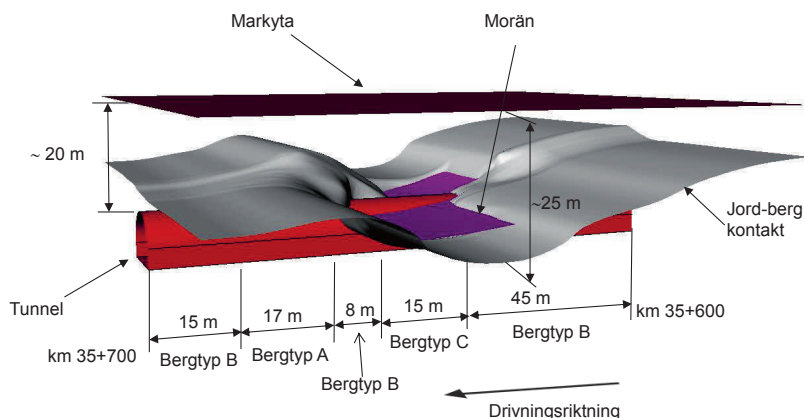
Overview of the Stockholm City-Line tunnel track location to the left and zoomed in plan view of Södermalm to the right, with the area of interest marked in yellow.

3.2 Beräkningsmodell

Den komplicerade stratigrafin i områden (se Figur 5) gjorde det nödvändigt att simulera tre olika bergmaterial, två olika jordmaterial samt injekterad jord. En idealplastisk Mohr-Coulomb materialmodell användes för alla materialen, med parametervärden enligt i Tabell 3.

För de initiala bergspänningarna har typvärdena för Södermalmsområdet använts, efter Perman och Sjöberg (2007), men orientering på största huvudspänning i modellen har ändrats från 110° till 160° . Detta ger ett enklare randvillkor till modellen och bedöms inte ha någon stor betydelse eftersom bergspänningarna sannolikt har liten inverkan på resultaten, enligt vad som framkom i principstudien. För de initiala jordspänningarna har ett gravitativt spänningsförhållande använts, där värdet på K_0 framgår av Tabell 3.

Randvillkoren till beräkningsmodellen utgörs av rullstöd på de vertikala ränderna. Den nedre horisontella randen låstes i både horisontal- och vertikalled. Den övre randen har simulerats som en fri yta, motsvarande markytan. Grundvattenytans läge var i verkligheten belägen i berget under och därför bedömdes att inga porvattentryck uppkommer i jordlagret. Detta innebär att vattenytans exakta läge har liten betydelse och därför inte inkluderats i analysen.



Figur 5 Jord-berg kontakt (i grått), tunnelsträckning (rött), markytan (brun) och moränlager (magenta) i passage under Maria Magdalena Kyrka mellan km 35+600 till 35+700.

Rock-soil interface (in grey), tunnel contour location (red), topography (brown) and moraine layer (magenta) in the area of the tunnel passage under the Maria Magdalena church from km 35+600 to km 35+700.

Tabell 3 Materialegenskaper för numeriska analyser av passagen under Maria Magdalena kyrka.

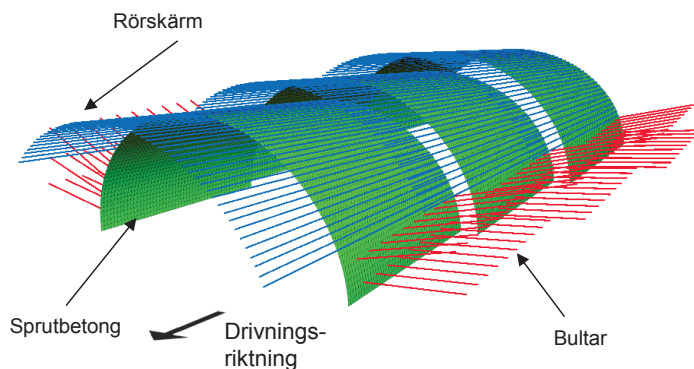
Material properties used in the numerical analyses of the passage under the Maria Magdalena church.

Material	E [MPa]	ρ [kg/m ³]	ν [-]	K_0 [-]	c [MPa]	ϕ [°]	σ_t [MPa]	ψ [°]
Bergtyp A	69 000	2650	0.25	-	6.6	58.3	2.4	7
Bergtyp B	46 000	2650	0.25	-	2.5	58.9	0.5	7
Bergtyp C	11 000	2650	0.25	-	1.0	51.9	0.08	0
Morän	100	2000	0.35	0.30	0.0	45.0	0.0	15
Sand	20	1600	0.35	0.43	0.0	35.0	0.0	5
Injektering	200	2000	0.25	0.43	0.1	35.0	0.2	5

E = elasticitetsmodul, ρ = densitet, ν = tvärkontraktionsstal, K_0 = vilojordtryckskoefficient
 c = kohesion, σ_t = draghållfasthet, ϕ_m = friktionsvinkel, ψ = dilatationsvinkel.

En komplicerad uttagsekvens har använts i det verkliga fallet. Denna har delvis förenklats i den numeriska modellen. Förstärkningen gäller för sträckan km 35+633 till km 35+663, uppdelat i tre olika faser (A, B och C) om 10 meter vardera. Salvlängd var 1 meter, och inledningsvis togs galleriet ut för hela sträckan (30 m), följt av utspärning av pallen för densamma.

Det första steget av förstärkningen bestod av jordinjektering, som simulerats som ett valv (1 meter tjocklek) med styvare och mer hållfast material ovanför anfanget av tunneln. Efter injekteringen påbörjas uttagssekvensen och förstärkningsåtgärder bestående av förbultning (spiling), systematisk bultning och sprutbetong, vilket redovisas i Figur 6. En mer utförlig beskrivning av tunneldrivning och utförd förstärkning ges i Lope Álvarez m.fl. (2016), där också materialparametrar för förstärkningselementen redovisas.



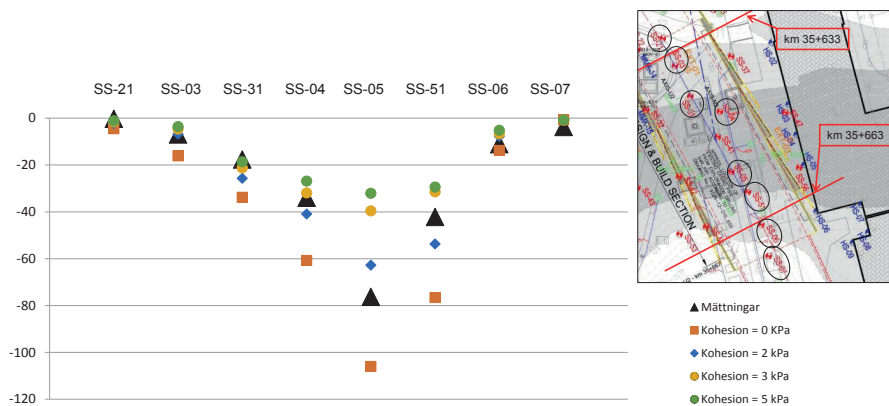
Figur 6 Förstärkningselement i *FLAC3D* efter utförd uttag av 30 meters tunnelsträcka.

*Structural elements in *FLAC3D* after the completion of the 30 meter tunnel excavation.*

3.3 Kalibrering och resultat

Kalibrering av modellen har genomförts genom jämförelser mot uppmätta deformationer på markytan, från mätningar på yteglar placerade ungefär i mitten av tvärsnittet av tunneln (se Figur 7, till höger). Kalibreringen har gjorts med fyra uppsättningar materialparametrar, där kohesion av sand-/åsmaterial och morän har varierats. Beräknade vertikala deformationer (sättningar) på markytan illustreras i Figur 7, tillsammans med uppmätta värden. Detta visar att modellen är mycket känslig för värdet på kohesionen i morän och sand-/åsmaterial. Den bästa överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta sättningar på markytan erhöles för en kohesion på 2.0 kPa. Detta fall har använts för de fortsatta beräkningarna och utvärderingarna.

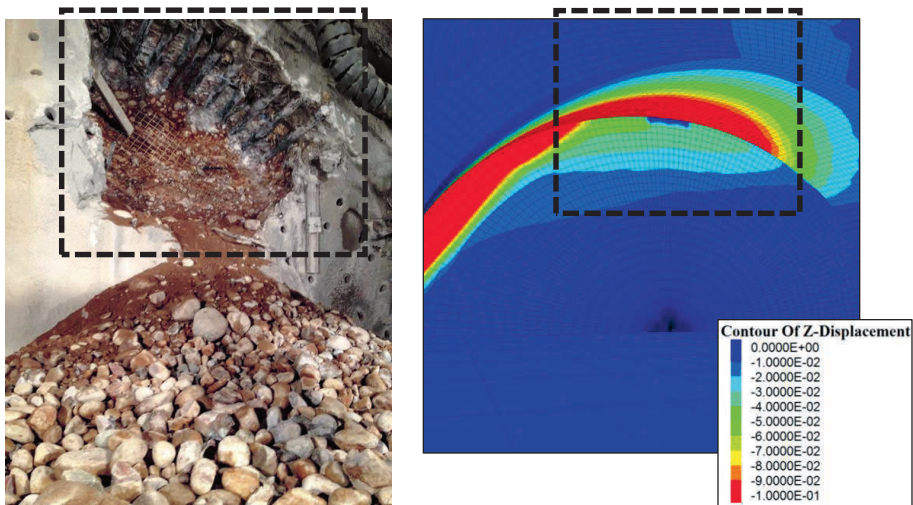
En god korrelation till uppmätta sättningar på markytan erhöles, och modellen visade att stora deformationer uppstod samtidigt i tunnelmodellen som vid tidpunkten för det verkliga raset (km 35+649), se Figur 8. Storleksordning av dessa deformationer var ca. 15 cm vid tunneltaket, men den exakta mekanismen, nämligen "flowing ground" kunde inte reproduceras p.g.a. vald modelleringsteknik.



Zdisp (mm)

Figur 7 Beräknade deformationer på markytan av de 8 kalibreringspunkterna för genomförda beräkningsfall, tillsammans med inmätta deformationer.

Calculated ground surface settlements for the 8 calibration points for the calibration models, together with the actual surface settlements.



Figur 8 Raset i tunnelpassage under Maria Magdalena kyrka till vänster (foto: Björn Stille), och beräknade vertikala deformationer (i meter) runt tunneln när kollaps skedde (km 35+649) till höger.

Partial tunnel collapse under Maria Magdalena church to the left (photo by Björn Stille), and calculated vertical deformations (in meter) around the tunnel when the collapse occurred (km 35+649) to the right.

4 DISKUSSION OCH SLUTSÄTER

Tunneldrivning med tvärsnitt i både jord och berg är teoretiskt komplicerat och principstudien har baserats på att isolerat studera en parameter åt gången och bedöma dess påverkan. Sammantaget har resultaten visat att jordens stratigrafi och jordlagrets egenskaper är de faktorer som påverkar beräknade deformationer mest.

Bergspänningarnas magnitud och riktning påverkar resultaten minst av de faktorer som studerats. Detta ger en indikation om vad som är viktigt att inrikta undersökningar mot för att kunna bedöma deformationer vid liknande problem.

I praktikfallsstudien demonstrerades att en god anpassning till uppmätta deformationer kunde åstadkommas. Det framkom också att materialparametrarna har stor inverkan på resultatet och att relativt små variationer i hållfasthetsparameterar får stor inverkan på beräknade deformationer. Den erhållna goda anpassningen till uppmätta deformationer kunde eventuellt även uppnåts med andra parameterintervall och vilket parameterintervall som bäst beskriver situationen i fält är svårt att avgöra.

Svårigheten att beskriva jordmaterialets egenskaper, via karakterisering eller provning, komplicerar prognoser på denna typ av konstruktion. Låga värden på kohesionen, mellan 0 och 5 kPa, visade på relativt stora skillnader i deformation. Värdena på kohesionen får betraktas som en beskrivning av ett kurvintercept från Mohr-Coulombs brottlinje. Att detta värde får relativt stor betydelse indikerar därmed att noggranna materialundersökningar i ett relevant spänningsintervall krävs, vilket för kohesion kan vara både utförandetekniskt svårt och kostsamt. Detta har inte studerats vidare inom detta arbete men en fördjupad känslighetsstudie på hur en ändring i beskrivning av kohesion, friktionsvinkel och deformationsmodul påverkar beräknad deformation i olika spänningsintervall skulle vara värdefull.

För framtida tunneldrivningar kan resultaten från denna studie användas för att inrikta undersökningarna som utförs och som underlag för beräkningsmetodik. Att göra en träffsäker prognos på vilka deformationer som uppkommer är naturligtvis svårt men relativa jämförelser där förstärkningsmängder eller grundläggningsdjup varierar kan vara mycket värdefulla som indikationer. Det förefaller också tydligt, baserat på resultaten, att känslighetsanalyser framförallt avseende jordlagrets egenskaper är värdefulla. En detaljerad bild bedöms inte krävas av bergets egenskaper eller spänningarnas magnitud och riktning, förutsatt att det är vanligt förekommande kompetent berg. Detta gäller för fallet med heterogena förhållanden och där skillnaden mellan jord- och bergmaterialets hållfasthet är uppskattningsvis 10 ggr eller mer.

Avgränsningarna i studien är flera och dessa bör på olika vis hanteras i framtida studier och i framtida projekt. Vår bedömning är exempelvis att "flowing ground" i hög grad är en byggfråga och om man i byggskedet kan undvika "flowing ground" ska denna fråga inte inverka på deformationerna. Avseende val av brottmodell och om analyserna görs som kontinuum eller diskontinuum samt förekomst av vibrationer är frågor som kan påverka deformationernas storlek. Dessa kan i framtida arbeten ägnas mer uppmärksamhet än vad som gjorts i denna studie.

FÖRFATTARNAS TACK

Arbetet har varit finansierat i sin helhet av BeFo, och har följts av en referensgrupp bestående av: Per Tengborg (Befo), Robert Sturk (Skanska), Björn Stille (Sweco), Åsa Fransson (Chalmers), L-O Dahlström (NCC/Chalmers) och Rikard Gothåll (Tyréns). Författarna vill rikta ett stort tack till referensgruppen för diskussioner och värdefull kommentarer under projektet.

Ett tack riktas även till Augusto Lucarelli (Itasca Consulting Group, Minneapolis), Frank Willer (Trafikverket) och Per-Evert Bengtsson (Statens Geotekniska Institut). Författarna tackar Trafikverket för tillåtelse att publicera denna artikel.

REFERENSER

Eriksson, M., Bertilsson, R., Sjöberg, J., Mas Ivars, D. & Lope Álvarez, D. 2016. Tunnelldrivning i heterogena förhållanden – översiktlig studie av styrande egenskaper avseende deformationer. BeFo Rapport 150 (ISSN 1104-1773), Stockholm: BeFo.

Google Earth 7.1 2015. [Hämtad 2016-02-01]

Itasca 2011. *FLAC* Version 7.0, Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

Itasca 2012. *FLAC3D* Version 5.0, Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

Lope Álvarez, D., Sjöberg, J., Eriksson, M., Bertilsson, R. & Mas Ivars, D. 2016. Tunnelling and reinforcement in heterogeneous ground – A case study. ***Proceedings Eight International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction (Luleå, Sweden, September 12-14, 2016)***, Paper No. 193.

Perman, F. & Sjöberg, J. 2007. Initiala bergspänningar i Stockholmsområdet – underlag för projektering av Citybanan, Vattenfall Power Consultant AB rapport till WSP, 122 p. (in Swedish).